

CAPÍTULO 2

SITUACIÓN ACTUAL

2.1.-INTRODUCCIÓN

Tras una profunda tarea de revisión bibliográfica y a falta de documentación y bibliografía referida al objeto de estudio de este trabajo, se ha planteado el capítulo 2, correspondiente a estado del conocimiento, del siguiente modo.

En primer lugar, se presenta una revisión general de los aspectos más relevantes que inciden en el hormigón proyectado por el proceso denominado vía húmeda -en la actualidad, técnica predominante frente a la vía seca especialmente en las obras de soporte de rocas, túneles y taludes- dado que permite obtener mayores rendimientos así como un control de la mezcla mucho más homogéneo en unas mayores condiciones de seguridad en el trabajo.

Una vez conocido el material, repasamos el marco legal del hormigón proyectado en España así como las propuestas de dosificación de distintas normativas y grupos de investigación.

Por último se recogen los principales aditivos utilizados en las actuales dosificaciones con hormigón proyectado por vía húmeda, muchos de ellos constituyen los verdaderos artífices de que las prestaciones del hormigón proyectado sean comparables a las de hormigón convencional.

Quiero resaltar que el hecho de que no se haya encontrado referencia alguna al tema de la utilización del hormigón armado proyectado en las normativas actuales,

siendo de una aplicación tan clara y directa como es el caso de la construcción de muchas de las estaciones de la Línea 9 del Metro de Barcelona, me ha motivado especialmente para profundizar en ello y, desde el trabajo y la dedicación, a contribuir en la medida de lo posible a ampliar el estado del conocimiento actual de este material.

2.2.-HORMIGÓN PROYECTADO

2.2.1.- Revisión histórica

El hormigón proyectado o gunita, asociada a la máquina conocida como ``Cement Gun'', ha seguido un curioso camino desde su invención en 1909. Fue concebida inicialmente para recrear esqueletos de dinosaurios, por el naturalista Carl Akeley, pero no fue hasta la celebración de la ``Cement Show'' en New York en 1910 cuando se introdujo en el mercado de la construcción.

Rápidamente se fue extendiendo su uso hasta que en 1945 ya existían más de 5000 máquinas de Gunitar en más de 120 países, periodo en el cuál, se profundizó mucho en el conocimiento de la técnica, aplicándose en campos tan diversos como la reparación de estructuras, depósitos, chimeneas etc..

A principio de los 50's comenzó una época de crisis que duró hasta finales de los 70's, debido a la especulación económica de dicha industria, dañando la calidad y credibilidad de este proceso.

A principio de los 80's, gracias a los nuevos avances tecnológicos y al desarrollo de la química aplicada al hormigón, el hormigón proyectado recobró parte de la credibilidad perdida. Precisamente, la química es la ciencia que está tirando de esta técnica en los últimos años, y con más fuerza que nunca, ya que permite equiparar y en multitud de ocasiones superar, al hormigón moldeado tanto en calidad como rentabilidad económica.

La principal aplicación del hormigón proyectado ha sido en obras para construcción de sostenimiento de túneles, pero cada vez son mayores las realizaciones de obras como son la estabilización de taludes, reparación de estructuras, depósitos, complejos lúdicos etc, y que aunque aporten nuevos condicionantes, abren un amplio abanico de posibilidades y nuevos retos tecnológicos.

2.2.2.- Aspectos generales

En el contexto del proceso constructivo de obras de hormigón la proyección del material sobre una superficie a alta velocidad constituye una técnica de puesta en obra interesante desde el punto de vista productivo, ya que reúne dos etapas del proceso (colocación y compactación) en una misma acción constituida por la proyección.

En la proyección, el material se introduce en un equipo de proyectar que lo impulsa a gran velocidad a través de una manguera hasta la boquilla de proyección. El control de la boquilla puede hacerse manualmente mediante un operador que la sostiene, o bien de forma mecánica mediante un robot de proyección controlado a distancia por un operador.

El material proyectado (mortero u hormigón) puede aplicarse sobre cualquier superficie o inclinación de la misma, si bien parte del material rebota, al no adherirse a ella. Este material rebotado constituye una característica intrínseca asociada a esta técnica, que tiene incidencia tanto en las propiedades del material colocado como en los aspectos económicos asociados al mismo. La economía en este rebote constituye, en consecuencia, una de las prioridades en la aplicación.

Por otra parte, al proyectar contra superficies inclinadas (no horizontales), hace que el peso propio del material pueda ser mayor que las fuerzas de adherencia entre el material y el soporte, y en consecuencia desprenderse del mismo, factor que obliga a limitar el espesor de la capa a hormigonar. Como orden de magnitud, espesores mayores de 20 cm deben realizarse en dos etapas, ello implica que a medida que aumentan los espesores, el rendimiento que puede alcanzarse con esta técnica disminuye, y por tanto, se ve limitado su campo de aplicación.

La proyección del hormigón se realiza, básicamente, mediante dos técnicas, denominadas vía seca y vía húmeda, las cuales dan lugar a materiales de características diferentes. Cabe mencionar la aparición de una técnica mixta o semi-húmeda, que como el propio nombre indica se queda a medio camino entre ambas técnicas.

Por otra parte, las exigencias actuales relativas a las cada vez mayores prestaciones del hormigón y a la necesidad de aumentar los rendimientos, motivan la presencia de nuevos componentes que suponen una sustancial modificación de los conceptos clásicos asociados al hormigón proyectado por vía húmeda, y que en particular inciden de manera especial en la trabajabilidad o docilidad necesaria impuesta por el propio proceso de proyección.

En este sentido, los conceptos de fluidez y cohesión de la mezcla en fresco prevalecen sobre otros planteamientos básicos extrapolados del hormigón convencional, en donde por ejemplo, la trabajabilidad se rige, fundamentalmente, por la relación agua-cemento del hormigón.

En su aplicación se ha ido evolucionando en los últimos años desde la vía seca, mayoritaria a principios de los 90, hacia la vía húmeda utilizada hoy en día con gran profusión, habiendo influido en este cambio razones de tipo laboral, técnico, económicas y más recientemente ambientales.

Este último aspecto viene determinado por el rebote que se produce, el cemento y el agua discurren por la red de drenaje, en la mayoría de los casos natural, entrando en contacto con cursos de agua o lo que es más grave, con acuíferos subterráneos próximos a la zona de vertido. Debido al marcado carácter alcalino (pH 13-14) del hormigón, provoca una variación del pH⁺ del agua (7-8), convirtiendo esa agua en inadecuada tanto para el hombre como para la gran mayoría de los seres vivos.

2.2.3.- Hormigón proyectado por vía húmeda

Si bien se ha comentado que existen básicamente dos sistemas de aplicación para el hormigón proyectado, denominados “vía seca” y “vía húmeda”, actualmente podemos decir que la implantación de la vía húmeda es prácticamente total, quedando muy pocas aplicaciones para la denominada vía seca

En el sistema de proyección denominado vía húmeda el material que se vierte sobre la tolva de recepción es hormigón en el sentido de que antes de iniciar la proyección el material ha sido amasado como si de un hormigón convencional se tratara. La impulsión del hormigón a través de la manguera se realiza por medio de una bomba de hormigón (movimiento de un pistón) hasta la boquilla, donde se le incorpora un chorro de aire a presión que le proporciona la velocidad necesaria para que el impacto sea efectivo.

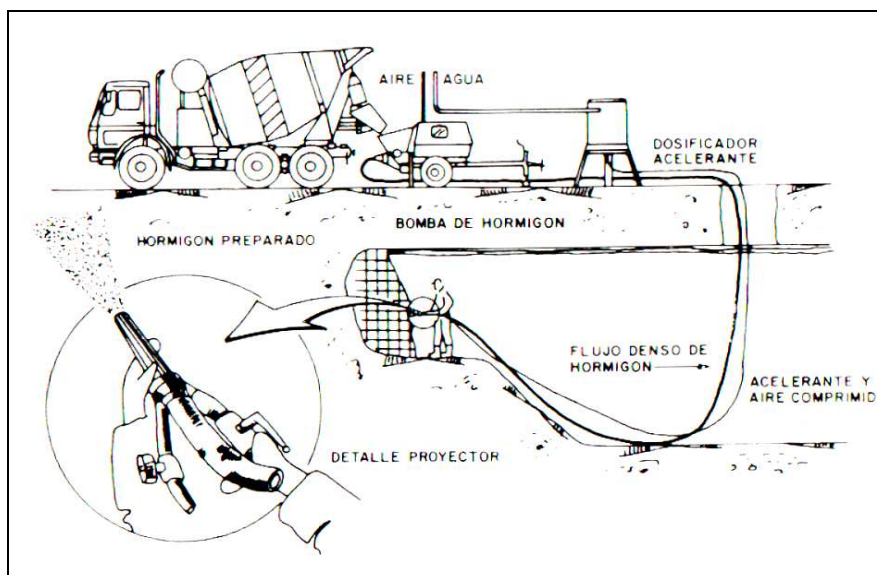


Figura. 2.1.-Esquema de proyección por vía húmeda.

La figura 2.1 muestra claramente el esquema del proceso, con control manual de la proyección, existiendo hoy en día numerosos sistemas de proyección totalmente automatizados. En este sistema se tienen unas condiciones de ejecución mucho más controladas que las obtenidas en la vía seca con lo que se consigue una mayor uniformidad del paramento proyectado.

Cabe destacar que la proyección por vía húmeda permite alcanzar mejores prestaciones ya que introduce menos aire por las diferencias en el transporte y se consigue un mayor control de la dosificación, especialmente de la relación agua/cemento ya que se realiza de forma análoga a un hormigón convencional.

En el marco de grandes producciones en cortos plazos de ejecución, la mejora de las condiciones en el trabajo y, el desarrollo de una gran gama de aditivos capaces de conferir al hormigón proyectado prestaciones cada vez mayores desde un punto de vista

estructural, el desarrollo de la vía húmeda en la última década del siglo pasado es total, quedando la vía seca prácticamente extinguida en actualidad.

2.2.4.- Aplicaciones

Quizás no exista otro proceso constructivo que ofrezca la flexibilidad y campos de utilización tan variados como presenta el hormigón proyectado. Ni que decir tiene, que cada aplicación requiere unas características resistentes, de durabilidad y/o, estéticas diferentes. A continuación se realiza una breve exposición de las distintas aplicaciones donde se viene utilizando el hormigón proyectado con éxito.

- ❑ Túneles: Es el campo donde más se ha desarrollado esta técnica y constituye una herramienta clave dentro del Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles (N.A.T.M). Se ha venido utilizando como sistema de sostenimiento provisional, pero ha medida que la técnica se ha ido desarrollando y aumentando las prestaciones del material proyectado, se ha utilizado como revestimiento definitivo en túneles. En este campo, la vía húmeda se ha impuesto claramente a la vía seca por razones de rendimiento y sobre todo por razones de durabilidad del material y mejora de las condiciones de trabajo en el interior del túnel. Tradicionalmente se ha combinado con la ferralla convencional pero cada vez más, por motivos operativos, se han incorporado fibras metálicas en el hormigón proyectado, constituyendo estas el único refuerzo al hormigón.
- ❑ Canalizaciones: Dadas las características lineales de este tipo de obras y el volumen de hormigón que ello representa, hace que el hormigón proyectado sea una técnica ideal para lograr grandes rendimientos, ya que se elimina del proceso constructivo la fase de compactación. Además presenta una gran afinidad a todo tipo de membranas o geotextiles que proporcionan la estanqueidad suficiente (figura 2.2).



Figura. 2.2.-Proyección en los paramentos de un canal.

- ❑ Estabilización de taludes: El hormigón proyectado es usualmente utilizado tanto para la protección de taludes de tierras frente a problemas como la erosión, como para la estabilización de macizos rocosos o bloques sueltos y evitar así desprendimientos, etc...La protección normalmente consiste en una capa de 50 mm de hormigón proyectado sobre todo el paramento, en ocasiones acompañado

por bulones. La adición de fibras metálicas en este campo es muy frecuente por el hecho de ayudar al hormigón a resistir impactos (figura 2.3).



Figura. 2.3.-Estabilización de talud en roca.

- ❑ Reparación de estructuras: Este es otro campo que ha ayudado al desarrollo del hormigón proyectado, y más concretamente, a ser utilizado como material estructural. La facilidad de acceso a cualquier esquina o paramento, unido a no tener que utilizar ningún tipo de encofrado más que el propio elemento a reforzar, ha contribuido a su rápida aceptación por los profesionales de este campo. Es aplicable tanto a relleno de pequeñas cavidades como a proyecciones masivas de material, dando lugar a nuevos elementos. Indudablemente los requisitos que debe presentar el material son mayores que en la mayoría de las otras aplicaciones.
- ❑ Depósitos: El hormigón proyectado se ha utilizado tanto para la construcción de depósitos en superficie como enterrados, siendo la motivación principal en ambos casos la estanqueidad. En la figura 2.4 se muestra un ejemplo.



Figura. 2.4.-Depósito superficial mediante hormigón proyectado.

- ❑ Piscinas: Debido a su capacidad de adaptarse a cualquier tipo de superficie o forma y la facilidad para proporcionar un acabado de calidad, ha provocado una aceptación cada vez mayor en este campo. Además son estructuras con una baja densidad de armaduras con lo que la aplicación del hormigón aún es más favorable. Han aparecido numerosos problemas en piscinas realizadas con

hormigón proyectado, pero han sido motivados por la mala ejecución de la proyección en la mayoría de los casos.

- ❑ Protección de estructuras metálicas: Este es un campo que viene a menos desde la aparición de productos sintéticos (espumas, etc) que proporcionan la misma protección y presentan ventajas tanto a la hora de la aplicación como de tipo económico.
- ❑ Elementos de hormigón armado proyectado: El hecho de trabajar con hormigón proyectado hace que se minimicen los tiempos y el coste de construcción debido a la desaparición de las partidas de encofrado. Este aspecto hace del hormigón armado proyectado un material sumamente atractivo.

Se destaca la cada vez más aplicada acción conjunta entre elementos de contención (pantallas continuas y pantallas de pilotes en terrenos rocosos) y elementos de rigidización tipo anillo que lejos de ser los delgados sostenimientos que propone el N.A.T.M para la construcción de túneles en roca, conforman auténticas secciones de hormigón armado con la peculiaridad de poder prescindir de todas las actuaciones asociadas al hormigón convencional, esto es: eliminación de todas las tareas de encofrado y desencofrado así como de sus riesgos derivados de la movilización de paneles mal cerrados durante el vertido y la ausencia de tareas de gran complejidad como el vibrado en el interior de los moldes.

Alrededor de esta idea, y sirviendo como ejemplo la actual construcción de la Línea 9 del Metro de Barcelona, se ha desarrollado el presente trabajo.



Figura. 2. 5.- Aplicación artística.

- ❑ Otros: Por su antigüedad cabe destacar la utilización del hormigón proyectado para la construcción de esculturas (figura 2.5) o escenarios en parques temáticos (figura 2.6) etc...Como se ha nombrado antes, la primera aplicación fue desarrollada para la construcción de esculturas de dinosaurios. También merece comentar la utilización para la construcción de pequeñas viviendas a modo de "Igloo" utilizando como encofrado balones inflados.



Figura. 2.6.-Recreación de escenarios.

2.2.5.- Fabricación, puesta en obra y control de calidad.

Hay tres factores principales, a parte de las características de los materiales, que influyen de manera fundamental en la fabricación y puesta en obra del hormigón proyectado que son: la planta de fabricación, el equipo de proyección y por último el operador ó gunitador.

La fabricación del hormigón proyectado por vía húmeda debe hacerse en plantas dotadas de todos los elementos necesarios para conseguir una mezcla homogénea así como de precisos sistemas de dosificación de aditivos y de los áridos. Uno de los factores que dificultan el correcto funcionamiento de los robots estriba en una mezcla no homogénea, por ejemplo cuando se utilizan fibras metálicas no se suele conseguir una buena dispersión de las mismas (formación de bolas de fibras o erizos).

En cuanto a los materiales componentes utilizados normalmente en la fabricación de hormigón proyectado, son muy similares a los empleados en los morteros y hormigones tradicionales.

Se pueden emplear prácticamente todos los tipos de cementos y sus mezclas con cales hidráulicas, sin embargo, en la mayoría de aplicaciones se requieren elevadas resistencias iniciales, siendo bastante generalizado el uso de cementos sin adiciones, de alta resistencia y de endurecimiento rápido (categoría 52,5R)

En cuanto a los ambientes de exposición, se sigue los mismos criterios que indica la E.H.E 08 (Instrucción de Hormigón Estructural Española).

Las dosificaciones de cemento son, en general, altas, llegándose hasta los 400-450 Kg/m³, dependiendo del tipo de aplicación. Acompañando al cemento pueden emplearse adiciones de cenizas volantes, microsílíce, látex, poliméricos, fibras etc. Este tema se aborda con mayor énfasis en el punto 2.2.8.

El agua debe estar libre de cualquier sustancia que pueda perjudicar al hormigón o a cualquier otro componente de la mezcla, como pueden ser las fibras metálicas, mallazos etc, rigiéndose por los criterios definidos en la E.H.E 08. El agua total, al igual

que en un hormigón convencional, es la suma del agua de adición más la propia de los áridos.

En el sistema de la vía húmeda, como ya se ha comentado, el agua se incorpora a los restantes componentes de la mezcla antes del transporte, y su contenido depende de las características del material a proyectar y de las limitaciones impuestas por el equipo de proyección. La relación agua-cemento en la vía húmeda, con la ayuda de superplastificantes va desde 0.35 hasta un máximo de 0.45.

Los áridos son el elemento de mayor volumen y peso que interviene en la fabricación del hormigón proyectado. Entre varios aspectos a considerar, y en función de las resistencias a la compresión que se especifiquen, han de considerarse aspectos como el rebote potencial, adherencia entre capas, si son materiales naturales o de machaqueo, granulometrías, etc.

También ha de considerarse la posible reacción álcali-árido, ya que puede ser el detonante de graves anomalías en las propiedades del material.

En el hormigón proyectado por vía húmeda tradicionalmente se utilizan áridos de 12 mm como fracción gruesa, no obstante, si queremos reducir el rebote se puede utilizar el árido de 8 mm, sin afectar a las resistencias finales.

Las arenas finas suelen favorecer la retracción y una mayor demanda de agua, por lo que deberán escogerse de acuerdo con un huso granulométrico adecuado.

A modo de orientación, se adjunta la tabla 2.1 que describe el huso de referencia que recomienda la normativa EFNARC, de amplia aceptación en Europa.

Tabla. 2.1.-Huso granulométrico EFNARC.

Tamiz mm	Mín %	Máx %
0.125	4	12
0.250	11	26
0.50	22	50
1.00	37	72
2.00	55	90
4.00	73	100
8.00	90	100
16.00	100	100

No obstante, para el relleno de grandes cavidades pueden emplearse áridos de hasta 25 mm.

Los áridos son responsables de gran parte de las propiedades mecánicas del hormigón proyectado debiendo tener en cuenta más allá de aspectos como la naturaleza y el tamaño de los mismos, aspectos asociados a su forma. En este sentido se ha podido

comprobar -tal y como refleja el artículo publicado recientemente del cual se adjunta referencia “Agulló.L”Et al”, Garcia.T, Aguado.A, Yubero.E(2009); *Verificación de la isotropía del hormigón proyectado por vía húmeda Materiales de Construcción Vol 59* - como el proceso de proyección de los áridos a través de la manguera en el seno del hormigón, favorece cierta orientación de los áridos en la dirección del flujo, propiciando un comportamiento que podemos calificar de anisótropo en el hormigón proyectado por vía húmeda.

Esta orientación se manifiesta especialmente en los áridos con un coeficiente de forma más bajo (lajas y agujas) y tiene un efecto claro sobre la resistencia y el módulo obtenido experimentalmente sobre probetas testigo extraídas de artesas. En la figura inferior se puede observar claramente el efecto del tamaño y la orientación.



Figura. 2.7.- Tamaño y orientación de áridos observados

En este sentido los áridos con una mayor longitud y tamaño sufren un proceso de orientación a lo largo de la manguera cuando son bombeados y un cambio de dirección al impactar sobre el soporte, dando lugar a resistencias menores en la dirección paralela a la proyección (generalmente de la que se extraen probetas testigo) en detrimento de una mayor resistencia en la dirección transversal. En lo que respecta al módulo la tendencia se invierte obteniéndose módulos mayores en la dirección transversal como consecuencia de la orientación en la dirección de mayor longitud, dando lugar a un elemento más rígido y por tanto con menor deformación.

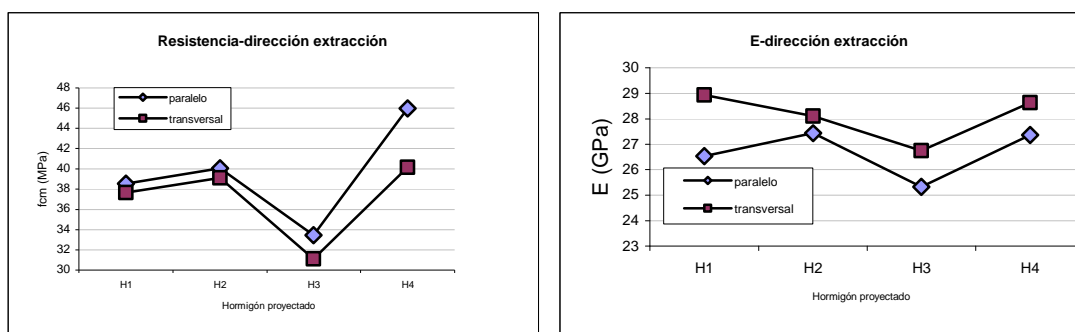


Figura. 2.8.- Resistencia y módulo vs dirección

Uno de los componentes que se vienen utilizando cada vez con más frecuencia en el hormigón proyectado es la microsílíce, en todas sus formas de presentación, de

entre las que se pueden destacar el humo de sílice densificado, el humo de sílice modificado o el humo de sílice en slurry y la sílice coloidal.

Otro de los componentes habituales en muchas aplicaciones de hormigón proyectado son las fibras, tanto plásticas como metálicas, que se utilizan como material de refuerzo.

Las fibras metálicas de acero de bajo contenido en carbono, con longitudes de hasta 30 mm, son las más empleadas en sostenimiento de túneles, revestimiento de taludes, refuerzos estructurales, etc. La dosificación más usual corresponde a valores entre 25-45 kg/m³ para fibras metálicas y de 4,5-10 kg/m³ para fibras sintéticas.

La incorporación de fibras modifica las propiedades de la masa fresca, reduciendo al mismo tiempo la fisuración y retracción, e incrementando la tenacidad del hormigón endurecido.

Hoy en día, la utilización de fibras metálicas es mayoritaria en todo tipo de aplicaciones frente a las fibras sintéticas, puesto que hasta el momento las prestaciones que se obtienen con estas últimas son bastante inferiores. Recientemente han aparecido en el mercado unas fibras sintéticas de alto módulo, que con dosificaciones de 10-12 kg/m³, alcanzan valores de absorción de energía similares a los que se alcanzan con dosificaciones de 30-40 kg/m³ de fibras metálicas de buena calidad, G. Canals (2002). Esto presenta ventajas en ambientes con presencia de agua, puesto que uno de los principales problemas de la fibra metálica es su rápida y generalizada corrosión, con los problemas que ello puede originar en el resto de la estructura. No obstante, la cantidad de fibras no es un inconveniente indicativo, ya que la forma y el tamaño influye de forma decisiva en las propiedades del hormigón.

Es frecuente que en la adición de fibras metálicas durante la fabricación del hormigón, presenten problemas en la dispersión de estas, aunque la utilización de superplastificantes que contienen dispersantes y la utilización de amasadoras en la fabricación del hormigón, reduce en su totalidad esta clase de problemas.

De todas formas, no se puede extrapolar resultados de unas aplicaciones a otras, dada la variedad de tipos de fibras, forma, longitudes, diámetros, materiales etc.

Al igual que ocurre en el ámbito del hormigón moldeado, se utilizan gran variedad de aditivos químicos como solución a diversos problemas asociados principalmente a la puesta en obra.

Una vez realizada una breve descripción de los diferentes componentes que forman parte del hormigón proyectado, pasamos a abordar lo relativo a la puesta en obra del material.

En la proyección por vía húmeda, el transporte del material a través de la manguera hasta la boquilla de proyección, se puede realizar mediante dos procesos bien diferenciados: el flujo diluido y fluido denso. El flujo diluido (semi-húmeda), se

encuentra actualmente en franco retroceso, ya que en comparación con el flujo denso no aporta grandes ventajas.

Para la proyección por flujo denso existen en la actualidad varios tipos de sistemas, el manual, en el que el operario/gunitador es el que controla la distancia, ángulo y espesor de proyección con sus propias manos, hasta los robots totalmente automáticos con control del espesor de gunita proyectada, siendo estos últimos especialmente diseñados para frentes de excavación en obras subterráneas, donde por las condiciones de espacio, salubridad e inseguridad del gunitador provoca una disminución en el rendimiento de la proyección, además de la homogeneidad del área proyectada.

El problema de la proyección por flujo denso viene de la necesidad de adaptar los tradicionales equipos de bombeo de hormigón, con lo que la cadencia de impulsos de los pistones da lugar a discontinuidades en la boquilla, que a su vez se traducen en la pérdida de homogeneidad del producto, efecto que se hace más evidente en el sistema de proyección manual que en el automatizado.

En la actualidad existe una gran variedad de robots automáticos (figura 2.7), boquillas de proyección, dosificadores de aditivos, etc, con lo que se debe intentar adaptar el equipo de proyección en función de la obra a acometer, no existiendo en la actualidad ningún equipo que se adapte al 100% de los requisitos que pueden aparecer dentro del amplio campo del hormigón proyectado.



Figura. 2.9.-Robot de proyección automático de última generación.

Tanto la calificación del gunitador como el proceso de proyección, varía sustancialmente en función del tipo de aplicación en particular. En el caso de una proyección sobre una superficie horizontal, escasamente armada y espesores delgados, puede realizarla un operario que simplemente conozca los procedimientos básicos de la proyección.

Sin embargo, la proyección de una superficie vertical, con la aplicación de varias capas de espesor considerable, requiere un operador experimentado, ya que el resultado

final del material dependerá en gran medida, de factores como ángulo de proyección, distancia o velocidad de material, anteriormente mencionados.

Como anteriormente se ha comentado, una de las características de calidad del hormigón proyectado es la homogeneidad. Esta sólo se consigue manteniendo un flujo continuo y uniforme del material a través de la boquilla, cosa arto difícil en lugares estrechos o con gran diversidad de frentes.

Una vez que el flujo del material se produce de forma continua, se orienta la boquilla hacia la superficie a proyectar, intentando mantener cuanto sea posible un ángulo de 90° con ésta, y nunca inferior a 45°. La distancia de la boquilla a la superficie a proyectar normalmente oscila entre 0.6 a 1.5 metros, considerándose este rango como un equilibrio razonable entre el rebote del material y la compactación proporcionada, según la distinta bibliografía consultada.

Por otro lado, en zonas densamente armadas, el gunitador debe variar el ángulo continuamente con el fin que las barras de acero queden totalmente rodeadas de material, a fin de que no queden huecos que puedan provocar problemas de adherencia acero-hormigón.

La velocidad de proyección también tiene gran importancia, ya que de ella depende en parte, el rebote del material. La velocidad del material viene determinada por la presión del aire introducido en la boquilla, recomendándose valores entre 5-7 bares.

En la tabla 2.2, se presentan diferentes variables que influyen directamente en el proceso de proyección.

Tabla. 2.2.-Variables durante el proceso de ejecución.

Velocidad de Proyección	
<i>Alta</i>	<i>Baja</i>
<i>Más rebote</i>	<i>Menos rebote</i>
<i>Mayor compactación</i>	<i>Menor compactación</i>
<i>Mayor mezclado*</i>	<i>Peor mezclado*</i>
Distancia	
<i>Alejarse</i>	<i>Acercarse</i>
<i>Menos rebote</i>	<i>Más rebote</i>
<i>Menos compactación</i>	<i>Mayor compactación</i>
<i>Más porosidad, huecos</i>	<i>Incrementa la densidad</i>
Agua	
<i>Más</i>	<i>Menos</i>
<i>Menos rebote</i>	<i>Más rebote</i>
<i>Mejor llenado de huecos</i>	<i>Más porosidad, huecos</i>
<i>Menor resistencia</i>	<i>Mayor resistencia</i>
<i>Aumenta la permeabilidad</i>	<i>Reduce la permeabilidad</i>

Una vez colocado el material, como en todo tipo de hormigones, el hormigón proyectado debe ser cuidadosamente curado, especialmente en este caso, puesto que su aplicación suele hacerse sobre áreas de gran superficie y con espesores relativamente delgados. Esto unido a las grandes cantidades de cemento, hace que el curado a edades tempranas sea especialmente importante para reducir la fisuración por retracción, fenómeno intrínseco al hormigón, pero no por ello debe descuidarse, puesto que afecta muy negativamente tanto a la durabilidad del hormigón como a la estética del elemento.

El método óptimo de curado es mantener la superficie del hormigón constantemente húmeda durante un periodo mínimo de 7 días, tapándola con una arpillera para mantener una humedad alta. Alternativamente se pueden usar agentes de curado, en forma de membrana líquida, que evita la libre evaporación del agua.

Si la aplicación del hormigón proyectado va a realizarse en diferentes capas o bien, las operaciones de acabado superficial se retrasan, es conveniente cubrir la superficie mediante plásticos con el fin de evitar el secado rápido. En aplicaciones al aire libre y en épocas de fuerte insolación, se procurará que estos plásticos sean de colores claros y se aumentará la frecuencia con la que se aplica el riego.

Ni que decir tiene, en épocas de tiempo frío, se protegerá el material con arpilleras u otros materiales aislantes de forma que el hormigón se mantenga a una temperatura adecuada para permitir un desarrollo normal de la resistencia.

En cuanto a las operaciones de acabado las técnicas son similares a las que se vienen aplicando para el hormigón moldeado. Por su importancia práctica, cabe destacar el rastrillado de toda la superficie. Como resultado de esta operación queda una textura linear muy rugosa, ideal para los casos en que deben aplicarse varias capas.

Además, si las características del hormigón proyectado dificultan la posibilidad de obtener unos requisitos estéticos determinados, por ejemplo, la incorporación de fibras, siempre existe la posibilidad de aplicar una última capa con diferente composición para mejorar la textura y tonalidad del hormigón.

Otro de los aspectos importantes dentro del campo de las obras de hormigón, se encuentra el control de calidad, siempre necesario para asegurar que el material proyectado cumple con los requisitos especificados en el proyecto.

Puede decirse que el control de calidad empieza con los ensayos previos realizados con anterioridad al comienzo de la obra en un tramo de ensayo a fin de conseguir una mezcla colocada que cumpla los requisitos especificados de evolución de resistencias con el tiempo, compacidad, impermeabilidad, homogeneidad, adherencia al soporte, porcentaje de rebote, etc. Estos ensayos previos deben realizarse con las instalaciones y materiales del hormigón definitivos.

Debido a la inevitable dispersión de los resultados en los ensayos, el diseño de la mezcla debe de tratar de producir un material con una resistencia superior al 15-20% de la especificada, sin pasar de los 6-7 MPa.

Los ensayos de control tienen como finalidad comprobar que la ejecución de la proyección se lleva a cabo siguiendo las directrices especificadas o bien la posibilidad

de detectar fallos en la etapa diseño del material etc. En la tabla 2.3 se indica la frecuencia con que deben realizarse estos ensayos.

Tabla. 2.3.-Frecuencia de los controles en la fabricación del hormigón.

Edad	Tipo	Frecuencia
H/MP Joven	H/MP I H/MP II	Una determinación cada semana de trabajo.
H/MP II	H/MP II	Una determinación al menos cada 2000 m ² de superficie proyectada o 2 semanas de trabajo.
H/MP III	H/MP III	Una determinación al menos cada 2000 m ² de superficie proyectada o 1 semana de trabajo. Como mínimo una vez al mes se realizará una granulometría y una determinación de la humedad.

Otro tipo de ensayos necesarios, sobre todo cuando se precisen altas resistencias iniciales son los ensayos de control de endurecimiento. Este tipo de ensayos se realizan in-situ pudiendo así comprobar que el hormigón gana resistencia según lo previsto y en caso contrario poder buscar soluciones lo antes posible estando muy relacionados con los criterios de aceptación o rechazo.

El criterio de aceptación frente a cualquier propiedad radica en que el valor medio de los resultados obtenidos no alcance los valores solicitados por el proyecto.

Los métodos de ensayo existentes se pueden dividir en ensayos directos o indirectos. Los indirectos normalmente son utilizados para determinar la resistencia a compresión a edades tempranas, cuando no se pueden extraer testigos del paramento proyectado, de entre los que destacan el ensayo de penetración (UNE 83 603/94), ensayo de arrancamiento (UNE 83 604/94) y el ensayo de penetración-extracción (UNE 83 605/91).



Figura. 2.10.-Aparato para el ensayo de arrancamiento.



Figura. 2.11.-Penetrómetro.

Los tres métodos citados proporcionan medidas indirectas de la resistencia a compresión obtenidas a través de unas curvas de calibración.

El valor absoluto de estos resultados no reproduce ningún valor de interés, sino se pueden comparar con otros que consideramos como referencia, para así poder decidir si la ganancia de resistencia va bien o si por el contrario debe rechazarse.

Estos ensayos tienen su rango de validez dentro de las primeras 48 horas, a partir de ahí es más eficaz la utilización de métodos directos. En la figura 2.12 se indica cuando es conveniente la utilización de uno u otro método de ensayo.

De entre los ensayos directos, los más comunes son el ensayo de resistencia a compresión y el de determinación del módulo de elasticidad sobre probetas testigo, por su relación directa con el cálculo estructural. Cuando se incorporan fibras se deben realizar los ensayos de resistencia a flexión y resistencia residual (ensayos de viga) y los ensayos de placa ó energía de absorción (EFNARTC, ROUND TEST y otros).

Otros ensayos menos habituales, pero no menos importantes en casos especiales, son los de permeabilidad, adherencia, resistencia a ciclos hielo-deshielo, porosidad, contenido de aire ocluido, retracción etc.

Para el control y verificación del hormigón proyectado existe una normativa española y también otra europea a disposición de los que diseñan los proyectos y contratistas.

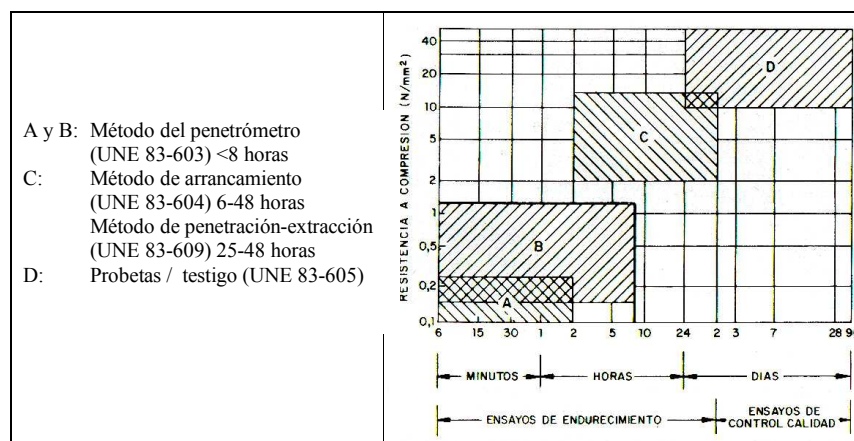


Figura 2.12. Rango de utilización de los diferentes ensayos.

2.2.6.-Características del hormigón proyectado

Una vez comentado lo relativo al proceso de fabricación, puesta en obra y control de calidad, se pasa a comentar las características fundamentales del hormigón proyectado como material de construcción.

□ Resistencia a compresión

Actualmente, la resistencia a compresión es el parámetro de control y diseño del hormigón proyectado. Las recientes aplicaciones e investigaciones en esta área, dan la posibilidad de conseguir hormigones proyectados de hasta 70 MPa de resistencia a compresión a la edad de 28 días. Sin embargo, las demandas actuales (tipo estructural) en la aplicación con hormigón proyectado mayoritariamente en la construcción de túneles por el N.A.T.M, se mantienen en 25 MPa. En la tabla 2.4, se muestran los requisitos en cuanto a resistencia que se demandan en la redacción de los proyectos actuales.

Tabla. 2.4.- Requisitos de proyecto tipo.

HP 25	Media	Mínimo
1 día	10	9
3 días	14	12
7 días	20	18
28 días	28	25

□ Porosidad

Una característica intrínseca al hormigón es su porosidad, siendo del orden del 5-6% para hormigones moldeados convenientemente vibrados. En el hormigón proyectado esta característica se ve acentuada, como consecuencia de la introducción de aire como medio de transporte y colocación de la mezcla, quedando parte de este aire atrapado dentro de la masa durante el proceso. La porosidad en hormigón proyectado por vía húmeda, en condiciones óptimas de los materiales y de ejecución, asciende por encima del 10-12%.

□ Homogeneidad

Un aspecto importante en el uso de hormigón proyectado es la homogeneidad de sus características durante la obra. El coeficiente de variación de dicha homogeneidad

aporta un dato muy importante sobre la calidad de la obra ejecutada. Un coeficiente de variación inferior al 10% es un valor muy aceptable.

□ Rebote

El rebote tiene un importante peso económico en el uso del hormigón proyectado, no sólo por lo que se refiere a la cantidad a transportar antes y después de la proyección, sino por la contaminación medioambiental que representa. La reducción del rebote es una demanda tecnológica del hormigón proyectado.

Independientemente de la dosificación, granulometría y química utilizada, la influencia del gunitador tanto en la aplicación manual como automática, es del orden del 80% en la consecución de un hormigón de calidad. La calidad de un hormigón proyectado depende en gran medida de la distancia entre la boquilla y la superficie a proyectar, el ángulo de incidencia y la velocidad de proyección. Este es uno de los mayores problemas que se encuentra esta técnica, puesto que la existencia de operadores con oficio es muy escasa, por lo que los resultados no son todo lo buenos que cabría esperar.

La tabla 2.5 muestra los valores del rebote, medidos según norma en distintas aplicaciones de hormigón proyectado en la actualidad.

Tabla. 2.5.-Rebote medio experimentado en obra.

Técnica	Ideal	Actual	1992
Vía húmeda	<15%	<15%	<18%

Estos valores dependen en gran medida de la inclinación de la superficie a proyectar, mientras que sobre una superficie horizontal está alrededor de 5%, en la proyección sobre la clave de un túnel alcanza perfectamente un 20%.

□ Formación de polvo

Los requerimientos actuales en cuestiones de seguridad y salud de los trabajadores son cada vez más exigentes, sobre todo en situaciones donde las condiciones ambientales son duras por naturaleza, como es el caso de la construcción de túneles y campo de aplicación estrella del hormigón proyectado. Todos los sistemas de proyección dan lugar a la formación de polvo, pero debe limitarse al máximo para que las condiciones de trabajo cumplan con las normativas vigentes.

Indudablemente, la técnica de proyección por vía húmeda reduce de forma considerable el polvo ambiental, pero debido a la necesidad de aire comprimido como vehículo de proyección, es imposible reducirlo en su totalidad.

El valor de formación de polvo deberá no ser mayor de 6mg/m^3 , a modo de orientación.

□ Capacidad de producción

El tiempo de aplicación es importante económicamente, por lo que un equipo de proyección deberá tener un rango de aplicación lo más flexible posible, para rentabilizar en cada caso la proyección. La tabla 2.6 muestra los valores de producción (m^3/h) que se están alcanzando actualmente en obra así como el ideal a alcanzar en un futuro próximo.

Tabla 2.6. Producción con hormigón proyectado.

Técnica	Ideal	Actual	1992
Vía húmeda	20-25	15-18	8-12

2.2.7. Clasificación de los Hormigones y Morteros Proyectados (H/MP)

La norma española UNE 83 607/94, clasifica los H/MP de acuerdo con la función estructural que van a representar en servicio y la edad del mismo.

Según la función estructural se clasifican en:

- H/MP Tipo I. No tiene funciones estructurales, empleándose como superficies de remate, relleno de cavidades, sellado de rocas para protegerlas de la meteorización, capas de aislamiento, etc. En general los requisitos para este tipo no están muy definidos.
- H/MP Tipo II. Tiene función estructural temporal y se emplea en estabilización y soporte temporal en túneles siguiendo el principio del Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles (N.A.T.M), estabilización de taludes etc. El recubrimiento de la armadura debe definirse según la clase de exposición a que este sometido el elemento cumpliendo con los requisitos definidos en los intervalos J1 y J2 que se muestran en la figura 2.11.
- H/MP Tipo III. Tiene función estructural y se emplea como revestimiento permanente en túneles, taludes, tanques, depósitos etc. En reparaciones de elementos estructurales de hormigón armado o pretensado, además de los requisitos de funciones estructurales, tiene que satisfacer otras propiedades especiales, como buena adherencia al hormigón ya existente, protección frente a corrosión de armaduras y limitaciones en el coeficiente de dilatación térmica.

Este tipo de requisitos exigidos conciernen especialmente a la resistencia a compresión y propiedades especiales. Es posible combinar sus funciones con las del H/MP II, lo que implica condiciones adicionales para el hormigón proyectado joven. En los requisitos de resistencia a compresión deben considerarse las variaciones con respecto al tiempo de las cargas y tensiones soportadas.

Con este tipo de H/MP deben tomarse medidas especiales para conseguir que su textura sea lo más homogénea posible. Si se emplean aditivos acelerantes, estos deben ser líquidos y estar en dosis reducidas. El tamaño máximo del árido debe ser menor de 12 mm. Si en la superficie de aplicación hay influencia de agua deben tomarse las medidas de precaución con relación al drenaje de la misma. Para evitar la corrosión de las armaduras, el recubrimiento no deberá ser menor de 3 cm.

De acuerdo con la edad del material proyectado se clasifica en:

- H/MP joven. Es aquel que tiene una edad inferior o igual a 24 horas. Su resistencia a compresión suele ser inferior a 5 Mpa y de este no se puede extraer testigos y para la determinación de la resistencia a compresión se debe realizar por métodos indirectos que se comentan más adelante. Se designa con la letra "J".
- H/MP maduro. El que tiene una edad superior a 24 horas.

Los dos criterios de clasificación permiten definir cualquier tipo de hormigón o mortero proyectado a efectos de especificaciones y control; así, por ejemplo un hormigón HP III-J es aquel que, teniendo función estructural, tiene menos de 24 horas, con todas las implicaciones que ello supone.

La experiencia en la aplicación del hormigón proyectado permite hacer una distinción más profunda de los hormigones denominados jóvenes, en función de unas características especiales que tienen que ver en gran medida por requerimientos de puesta en obra.

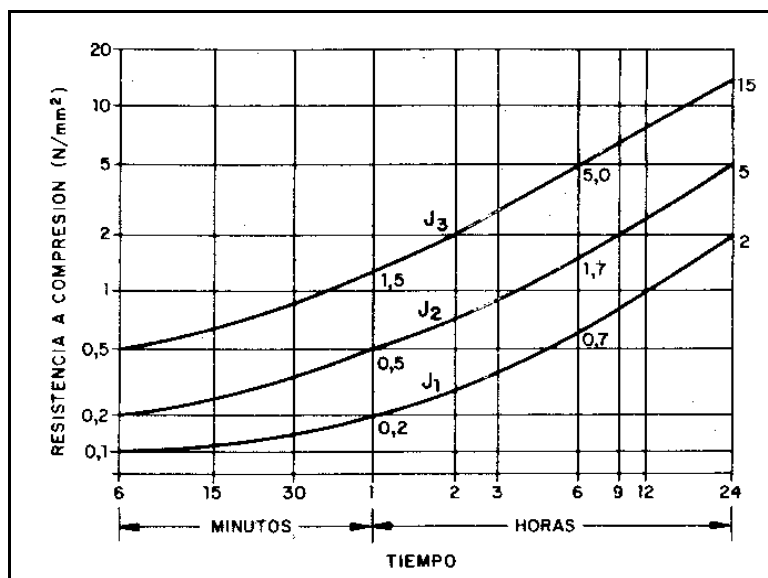


Figura. 2.13.-Clasificación de los hormigones proyectados "jóvenes".

Se aplican los requerimientos especiales J1 y J2 en los casos:

- a) J1. Cuando el material tiene que colocarse lo más rápidamente posible en capas gruesas (incluso en bóvedas), cuando se produzcan afluencias de agua y o se produzcan tensiones como consecuencia de diversas operaciones inmediatas a la colocación (vibración por voladuras, perforaciones, etc).

- b) J2. Igualmente que J1 pero por motivos de acomodamiento del terreno, las tensiones sobre el material proyectado son grandes en un corto periodo de tiempo. Mayor grado de exigencia.
- c) J3. Cuando por situaciones excepcionales, se precisen altas resistencias iniciales, lo que en la mayoría de casos obliga a reducir la resistencia a largo plazo. (Uso de acelerantes basados en aluminatos especialmente).

Los niveles de resistencia de los H/MP están basados en los valores de resistencia a compresión determinados mediante ensayos de control de calidad en testigos cilíndricos extraídos del paramento proyectado. (tabla 2.7)

Las resistencias pueden referirse a 7, 28, 60 ó 90 días, indicándose esta entre paréntesis, a continuación del valor de la resistencia. Por ejemplo HP 20 (90).

Se considera que un hormigón proyectado cumple con esta especificación si la media de 5 testigos cilíndricos (75x150 mm) extraídos de un mismo hormigón es superior o igual a este.

Debido al uso cada vez mayor de la técnica de proyección en obras de hormigón, los requerimientos hacia este material han ido creciendo paralelamente, siendo relativamente corriente encontrar proyectos donde se especifique resistencia frente ataque químico, resistencia a ciclos hielo-deshielo, impermeabilidad, resistentes al fuego e incluso hormigones de alta resistencia ($>50 \text{ N/mm}^2$).

Tabla. 2.7.-Tipos de resistencias usuales de proyecto.

Niveles	Valor medio mínimo de la resistencia a compresión en N/mm^2	Observaciones
H/MP 15	15	Con requisitos J1 ó J2, resistencias generalmente alcanzables a los 28 días.
H/MP 17,5	17,5	
H/MP 20	20	
H/MP 22,5	22,5	Con requisitos J1 ó J2, resistencias máximas alcanzables a los 28 días.
H/MP 25	25	Con requisitos J1 ó J2, resistencias máximas alcanzables a los 90 días.
H/MP 30	30	
H/MP 35	35	Sin requisitos especiales para el H/MP "joven" (por ejemplo la mayoría de trabajos con hormigón armado).
H/MP 40	40	

2.2.8.-Dosificación del hormigón proyectado

2.2.8.1.- Según distintas normativas

La consecución de un hormigón proyectado capaz de satisfacer las prestaciones requeridas, tanto técnicas como económicas, debe contemplar las proporciones óptimas de la mezcla asociadas a la tecnología empleada para la proyección, y en particular aquellas que conciernen al comportamiento en fresco de la mezcla, en el sentido de posibilitar el transporte adecuado hasta la boquilla y permitir una proyección minimizando la cantidad de material rebotado.

En el hormigón convencional existen distintos métodos de dosificación como son entre otros, ACI (1980), Faury (1944), Bolomey (1925) y Fuller (1907) que gozan de un amplio reconocimiento a nivel internacional. En el contexto del hormigón proyectado existen varios procedimientos, aunque ninguno de ellos está universalmente asumido, basados fundamentalmente en aspectos empíricos, fruto de la experiencia personal.

En este sentido, un hormigón proyectado presenta dos fases en su composición, una primera, inicial o de partida antes de proyectar y, una segunda, correspondiente al hormigón colocado. La principal diferencia entre ambas es producto del rebote del material al chocar sobre la superficie de proyección, siendo este rebote variable en función de los distintos componentes del material. A continuación se exponen los criterios que especifican varias asociaciones internacionales de reconocido prestigio.

American Concrete Institute (ACI)

La normativa americana ACI-506 R, indica que no existe un método reconocido para el hormigón proyectado por vía seca, y que en el caso de la vía húmeda, la dosificación puede hacerse basándose en criterios para hormigones bombeables ACI-211.

- ❑ Relación agua / cemento: Se propone una relación agua/cemento en peso, para la vía húmeda de 0.40-0.55. Este valor sin duda sería menor en caso de revisión por la aparición de plastificantes de alta actividad en los últimos años.
- ❑ Consistencia: Considera que el asiento de la mezcla en la vía húmeda está determinado por el valor mínimo que acepta el equipo de proyección, dando a modo de orientación el rango de 40-75 mm.
- ❑ Cemento: Para la vía seca se da una serie de valores en función de la resistencia característica de diseño pero la omite en el caso de la vía húmeda, por lo que da ha entender que sigue los criterios utilizados para hormigón convencional.
- ❑ Curva granulométrica: Define la granulometría del árido combinado en función del tamaño máximo del árido grueso.
- ❑ Tamaño máximo: Comenta que el valor del tamaño máximo para el mortero proyectado sea igual a 9.5 mm mientras que para hormigón proyectado llega hasta 19.05 mm.

- ❑ Relación cemento/ árido fino: Considera una relación cemento/ árido fino para el procedimiento de vía seca pero no para la vía húmeda.
- ❑ Acelerante: Esta prescripción se ha quedado obsoleta con la aparición de los nuevos acelerantes libres de álcalis.

The Concrete Society (1980)

- ❑ Relación agua / cemento: Para la vía húmeda no establece ningún rango específico.
- ❑ Relación cemento / áridos totales: Plantea una relación cemento / áridos totales para vía húmeda de 1:6.
- ❑ Tamaño máximo: Establece que es un mortero proyectado aquel que tenga un tamaño máximo inferior a 10 mm, y por encima de 10 mm se considera un hormigón proyectado. No establece un tamaño máximo restringiéndose a lo que acepte el equipo de proyección.

Association Française des Travaux Souterrains (AFTES)

- ❑ Cemento: Establece una cantidad mínima de 275 kg/m^3 para la vía seca y unos 350 kg/m^3 para la vía húmeda.
- ❑ Curva granulométrica: Proporciona una serie de usos granulométricos en función del tamaño máximo del árido.
- ❑ Contenido de finos: Recomendado que el porcentaje de finos menores a 0.075 mm (cemento, áridos y filler) sea $>17\%$ del peso de la mezcla.
- ❑ Tamaño máximo: Recomendado un tamaño máximo para la vía húmeda de 16 mm.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR)

- ❑ Relación agua / cemento: Limita la relación agua cemento en la vía húmeda en 0.6.
- ❑ Cemento: Estima una cantidad mínima de 350 kg/m^3 para hormigón proyectado con tamaño máximo de 8-25 mm.
- ❑ Relación hormigón colocado/partida: Indica una variación entre el hormigón de partida y el colocado debida a la proyección en el rango 1-1.21.
- ❑ Relación cemento / árido fino: Presenta una tabla en la que relaciona la resistencia característica del hormigón con dicha relación.
- ❑ Curva granulométrica: Se limita una curva granulométrica del árido combinado en función del tamaño máximo del árido.

- ❑ Contenido de finos: Estima un porcentaje mínimo que pase por el tamiz de abertura 0.08 mm en un 2% y por el tamiz de 0.25 un 8-12%.
- ❑ Módulo de finura: Recomienda que el módulo de finura del árido fino este comprendido entre 2.4-3.2.
- ❑ Tamaño máximo: Para un mortero proyectado lo establece en 8 mm mientras que para un hormigón lo establece en 25 mm.
- ❑ Microsílice: Se considera sustituir un porcentaje de cemento comprendido entre 5-15% en peso de cemento.
- ❑ Acelerante: Establece un rango de utilización de 2-8% del peso de cemento.

European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC)

- ❑ Cemento: Recomienda un contenido mínimo de cemento de 300 kg/ m³.
- ❑ Curva granulométrica: Propone el empleo de curvas granulométricas para el árido combinado.
- ❑ Tamaño máximo: Recomienda un tamaño máximo de árido de 16 mm.
- ❑ Microsílice: considera la sustitución de hasta un 15% del peso de cemento.

American Society of Civil Engineers (ASCE)

- ❑ Consistencia: Considera un mínimo proyectable de 75 mm.
- ❑ Cemento: Recomienda un contenido de cemento comprendido entre 300-415 kg/m³.
- ❑ Curva granulométrica: Se limita a dar un uso granulométrico del árido combinado.
- ❑ Tamaño máximo: El tamaño máximo lo establece en <20 mm.
- ❑ Microsílice: considera una sustitución de un 7-15% en peso de cemento.

En la tabla 2.8 se resumen las distintas variables de dosificación que contemplan las principales normativas dentro del hormigón proyectado tanto para vía húmeda como para vía seca.

A parte de estas normativas, existen numerosas publicaciones de muy diversos autores, tanto de personal investigador como por parte de diferentes fabricantes de equipos de proyección que no dejan de ser particularizaciones de las especificaciones marcadas en las diferentes normas.

A nivel de normativa y en lo que respecta a aspectos tan primigenios como este, la dosificación del hormigón proyectado, no existe consenso universal al respecto, siendo las principales normativas de principios de los años 90 y habiendo

quedado lógicamente superadas por estudios posteriores, en parte, por los grandes avances que permite el desarrollo de aditivos para el hormigón.

Tabla 2.8. Variables para dosificación de hormigón proyectado.

Variables principales		ACI 1990	AFTES 1982	AENOR 1994	EFNARC 1996	ASCE 1995
Relación a/c	Vía seca	0,3-0,5		0,3-0,6	0,3-0,5 (0,55)	0,3-0,4
	Vía húmeda	0,4-0,55				-
Cantidad cemento (kg/m ³)		300-500		350-400	>300	300-500
Consistencia (vía húmeda)		40-75 mm	100-150 mm			<75 mm
Contenido de finos			Finos > 17% (cem+filler)	Finos > 2%		
Curva granulométrica		Sí según tamaño máx.	Sí según tamaño máx.	Sí según tamaño máx.	Sí	Sí según tamaño máx.
Rel. Cemento/árido fino				Sí		
Rel. Cemento/árido total		Sí				
Mód. Finura del árido fino				2,4-3,2		
Humedad del árido fino (vía seca)		3-6%	2-4%	2-6%	<6%	
Tamaño máximo del árido		19,05 mm	16 mm	25 mm	16 mm	19,05 mm
Contenido de acelerante		2% cloruro cálcico		Aluminatos: 2-8% Silicatos: 10-15%		2% cloruro cálcico
Cantidad de microsílíce				5-10% (<15%)	<15%	7-15% en peso cem.
Contenido fibras de acero		2% en volumen		2-5% en peso		0,5-2% en volumen
H _c /H _p	Vía seca	Sí		1-1,35		
	Vía húmeda	-		1-1,21		

2.2.8.2.-Propuesta metodológica de dosificación

En el ámbito del Laboratorio de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña, se desarrolló una metodología específica de dosificación para hormigón proyectado (J.Rodríguez 1997) con el objetivo de establecer un procedimiento sistemático, basado en criterios teóricos y experimentales, de fácil aplicación que proporcionara hormigones capaces de satisfacer los requisitos de proyecto, tanto técnicos, económicos y de durabilidad.

Esta metodología de dosificación, se fundamenta en las modificaciones producidas en la composición, entre el hormigón de partida y el hormigón colocado, que el propio sistema de puesta en obra introduce en el material, como consecuencia del rebote y de la incorporación de aire como sistema de transporte y proyección.

Partiendo de este principio, se considera que las características del hormigón colocado serán las correspondientes al hormigón de partida modificadas por la colocación/proyección, de acuerdo con la expresión (1). (Esta situación también se produce en un hormigón convencional, si bien, las variaciones por colocación son más pequeñas y en sentido positivo de mejorar las prestaciones).

$$\text{Hormigón colocado} = \text{Hormigón de partida} - \text{Variación por la colocación} \quad (1)$$

Definidas las características del hormigón de colocado, con la finalidad de cumplir con los requisitos necesarios para la aplicación estructural en estudio, y evaluada la influencia de la puesta en obra por la proyección, se obtiene la dosificación del hormigón de partida.

La metodología de dosificación se articula, por tanto, en torno a tres fases principales:

- ❑ Evaluación de las modificaciones que el propio sistema de puesta en obra introduce en el hormigón. (Relativa a los coeficientes de rebote)
- ❑ Definición del hormigón colocado teniendo en cuenta las prestaciones requeridas.
- ❑ Determinación de la composición del hormigón de partida.

A continuación se desarrollan cada una de estas etapas, presentando tablas de datos necesarios para llevar a cabo el proceso.

❑ **Etapla primera: relativa a los coeficientes de rebote**

En esta etapa se evalúan los cambios de composición del hormigón debido a la proyección. Para ello se determinan los coeficientes parciales de rebote para cada componente y el coeficiente de rebote medio.

El rebote en un hormigón proyectado, medido generalmente en porcentaje de la mezcla de partida, está influido por cada uno de los agentes principales que intervienen, los cuales podemos agruparlos en:

- Equipo técnico y humano de proyección
- Características del soporte sobre el que se proyecta

-Composición del hormigón de partida

En general, se determina un rebote medio, dada la evidente repercusión económica del mismo, no siendo habitual la determinación de los coeficientes parciales de rebote de cada uno de los componentes, ni la realización de un análisis de la influencia de cada uno de los agentes antes señalados.

En la tabla 2.9 presentan los diferentes coeficientes parciales de rebote de los distintos materiales constituyentes, tanto para vía seca como húmeda.

Tabla. 2.9.- Coeficientes parciales de rebote.

Coeficiente	Vía seca	Vía húmeda
r_a	11-13%	7-9%
r_c	7-9%	5-7%
r_s	$0,22 \cdot \sqrt[3]{d_m}$	$0,12 \cdot \sqrt[3]{d_m}$
	d_m es diámetro medio representativo del árido correspondiente al tamiz en mm con el que pasa menos del 25% del material.	
r_g	$0,22 \cdot \sqrt[3]{d_m}$	$0,12 \cdot \sqrt[3]{d_m}$
	d_m es diámetro medio representativo del árido correspondiente al tamiz en mm con el que pasa mas del 50% del material.	
r_m	18-25%	10-14%

Así la estimación del coeficiente de rebote medio se realiza mediante la siguiente expresión:

$$r_m^2 = r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 \quad (2)$$

donde:

r_m es el rebote medio del hormigón proyectado

r_1 es el coeficiente que depende del equipo técnico y humano

r_2 es el coeficiente que depende de las características del soporte a proyectar

r_3 es el coeficiente que depende de la composición del hormigón de partida

Los factores correspondientes al coeficiente r_1 , no son intrínsecos de la dosificación, por lo tanto se consideran independientes a la misma. Esta hipótesis no es del todo cierta pero constituye una simplificación que no induce a errores de consideración.

El coeficiente r_2 , relativo a las características de la superficie a proyectar, también se considera independiente al proceso de dosificación, por lo que no se considera para la estimación del coeficiente de rebote medio. Este factor toma especial protagonismo en la segunda etapa, a la hora de establecer el tamaño máximo de árido del hormigón colocado.

Finalmente, se puede expresar el coeficiente de rebote medio, simplemente en función de las características del hormigón de partida (totalmente conocidas), mediante la expresión:

$$r_m \cong r_3 = \frac{A_p \cdot r_a + C_p \cdot r_c + S_p \cdot r_s + G_p \cdot r_g}{A_p + C_p + S_p + G_p} \quad (3)$$

siendo:

r_3	Coef. que depende de la composición del hormigón de partida
A_p, C_p, S_p, G_p	Cantidad de agua, cemento, arena y gravilla de partida
r_s, r_c, r_a, r_g	Coef. Parcial de rebote del agua, cemento, arena y gravilla

□ Etapa segunda: relativa al hormigón colocado

Se define la dosificación del hormigón colocado sobre la base de los puntos siguientes:

a) Tamaño máximo del árido:

Como consecuencia del distinto rebote en los diferentes tamaños de árido se produce una variación de la granulometría del árido, traduciéndose en una reducción del tamaño máximo (T_{max}) del árido en el hormigón colocado:

$$T_{MAX} = t_{max} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \quad (4)$$

siendo:

t_{max}	tamaño máximo del árido de partida (preferiblemente < 12)
-----------	---

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ influencia del sistema de proyección, de la superficie a proyectar y de la tixotropía de la mezcla.

Tabla. 2.10.-Coeficientes correctores del tamaño máximo del árido.

γ_1 Influencia del sistema de proyección		Vía seca			0,95
		Vía húmeda			0,98
γ_2 Influencia de la superficie a proyectar	γ_{21} Influencia por las características de la superficie	1 capa	Blanda	Arena Arcilla blanda	1,00
			Media	Hormigón Madera	0,98
			Dura	Roca Acero	0,94
		2 ó más capas			0,98
	γ_{22} Influencia por la posición de la superficie	Suelo			1,00
		Pared			0,98
		Techo			0,94
γ_3 Influencia de la tixotropía de la mezcla		Óptima	Mezcla con aditivo tipo plastificante y adiciones, tipo microsilíce, que mejoren las características tixotrópicas.		1,00
		Buena	Mezcla con incorporación adiciones mejoren las características tixotrópicas.		0,97
		Regular	Mezcla sin agentes que mejoren las características tixotrópicas		0.94

En la tabla 2.10 se presentan los diferentes coeficientes correctores del tamaño máximo del árido en el hormigón colocado. Cabe destacar que el coeficiente γ_{22} , en el caso de que la proyección se realice en distintas posiciones (suelo, pared, techo), se puede establecer como:

$$\gamma_{22} = \frac{\sum \gamma_{22i} \cdot S_i}{\sum S_i} \quad (5)$$

siendo S_i la superficie a proyectar en cada una de las posiciones.

b) Cantidad de cemento del hormigón de partida

La dosificación de cemento del hormigón de partida es una variable a fijar por el usuario. Se parte del echo de que tanto en la proyección por vía seca como por vía húmeda, el transporte requiere unas cantidades mínimas de finos que principalmente

serán adoptados por el cemento, además la mayor porosidad como consecuencia de la proyección produce una disminución de la resistencia a compresión, siendo necesario aumentar la cantidad de cemento si se quiere mantener un valor determinado de resistencia.

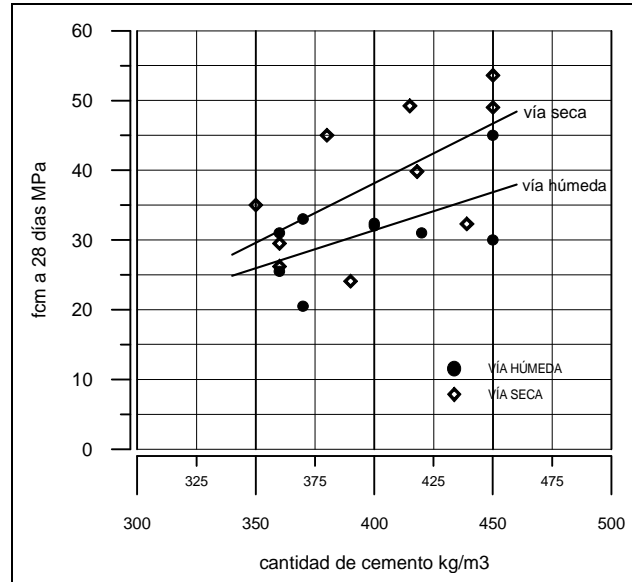


Figura. 2.14.-Resistencia media a compresión vs Dosificación de cemento.

A partir de resultados obtenidos en distintas aplicaciones, en la figura 13 se relaciona la resistencia media a compresión y la dosificación de cemento en la mezcla de partida.

Sobre la base de lo argumentado se recomienda que el contenido de cemento del hormigón de partida se sitúe entorno a 375 –425 kg/m³ para valores mínimos de la resistencia a compresión del hormigón a 28 día comprendidos entre 25-35 MPa.

c) Cantidad de agua

Para determinar el agua del hormigón colocado recurrimos a la fórmula de Feret (1896), aplicable a distintas edades, en la que se relaciona la resistencia característica f_{ck} con el volumen de agua a , el volumen de cemento c y el volumen de poros P_t del hormigón:

$$f_{ck} = k \cdot \left[\frac{c}{c + a + P_t} \right]^2 \quad (6)$$

donde k es un coeficiente que tiene en cuenta la edad y categoría del cemento siendo su valor independiente del sistema de proyección elegido (vía seca o húmeda).

Para los tipos de cemento utilizados habitualmente se pueden considerar los siguientes valores de la tabla 2.11.

Tabla. 2.11.-Factor k en función de la edad de referencia.

Edad	k
3	1300
7	1900
28	2800

El volumen de poros del hormigón se considera, como primera aproximación, del 17% respecto del volumen total en la vía seca y del 10-12% en la vía húmeda.

d) Cantidad de áridos

Como curva granulométrica de referencia del hormigón colocado utilizamos el método de Bolomey, que considera la contribución del cemento como un componente más de leños finos, pero con las modificaciones oportunas para un hormigón proyectado:

$$y = b + (100 - b) \sqrt{\frac{d}{T_{MAX}}} \quad (7)$$

siendo:

- y porcentaje en volumen que pasa por el tamiz de abertura d.
- b parámetro adimensional (b=16)
- d abertura tamiz en mm
- T_{max} tamaño máximo real del árido colocado en mm

Determinadas proporciones de árido grueso g y fino s para conseguir la composición granulométrica que más se ajuste a la curva de referencia, se determinan las cantidades de áridos del hormigón colocado.

El ajuste a la curva granulométrica se realiza con la curva correspondiente al hormigón colocado, obteniendo de manera inmediata la curva del hormigón de partida.

$$S_c = s \cdot 1000 \cdot (1.025 - I_c) \cdot \gamma_s \quad (8)$$

$$G_c = g \cdot 1000 \cdot (1.025 - I_c) \cdot \gamma_g \quad (9)$$

siendo:

- S_c y G_c cantidad de árido fino y grueso en Kg / m³
- s y g proporciones de árido grueso y fino
- I_c volumen de huecos del esqueleto granular del hormigón (volumen de agua + volumen de poros)
- γ_s y γ_g peso específico del árido fino y grueso en kg / dm³

□ Etapa tercera: relativa al hormigón de partida

Finalmente se determina la composición del hormigón de partida a partir del hormigón colocado. Para ello recurrimos al principio de la propuesta que nos dice que el hormigón colocado (H_c) es el de partida (H_p) menos el material rebotado ($r_m \cdot H_p$).

$$H_c = H_p - r_m \cdot H_p = (1 - r_m) \cdot H_p \quad (10)$$

Si la relación entre hormigón colocado y hormigón de partida se expresa en volumen, h_c y h_p respectivamente, se obtiene:

$$h_c = \frac{1 - r_m}{\gamma_c} \cdot \gamma_p \cdot h_p \quad (11)$$

$$\text{si } h_p = 1 \text{ m}^3 \quad hc = (1 - r_m) \cdot \square_p / \square_c \quad (12)$$

siendo:

H_c y H_p	cantidad de hormigón colocado / de partida
h_c y h_p	volumen de hormigón colocado / de partida
γ_p y γ_c	densidad aparente del hormigón colocado / de partida
r_m	coeficiente de rebote medio del hormigón proyectado

Asimismo podemos relacionar las cantidades de partida y colocado, en peso, de cada uno de los componentes, que divididas por el volumen del hormigón colocado nos dará la relación en kg/m^3 .

$$C'_c = (1 - r_c) \cdot C_p \cdot \frac{1}{1 - r_m} \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_p} \quad (13)$$

$$A'_c = (1 - r_a) \cdot A_p \cdot \frac{1}{1 - r_m} \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_p} \quad (14)$$

$$S'_c = (1 - r_s) \cdot S_p \cdot \frac{1}{1 - r_m} \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_p} \quad (15)$$

$$G'_c = (1 - r_g) \cdot G_p \cdot \frac{1}{1 - r_m} \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_p} \quad (16)$$

□ Incorporación de otros componentes

En el caso de hormigón proyectado por vía húmeda, la dosificación se complementa con la incorporación de un superplastificante con el objeto de conseguir la fluidez necesaria para el bombeo de la mezcla.

La dosificación de los acelerantes se determina mediante la elaboración de amasadas de prueba.

Por otro lado en la proyección, es habitual la incorporación en el material de otros constituyentes con el objeto de mejorar sus propiedades (microsílice, fibras, etc...), en estos casos, también es aplicable la presente metodología. Con respecto al humo de sílice, adición habitual en el hormigón proyectado, una forma simplificada de plantear su incorporación es considerarla como sustitución, en porcentajes entorno al 5-10% del cemento en el hormigón de partida. Su incorporación provoca un beneficio económico ya que reduce el rebote durante la proyección y favorece la adherencia entre el hormigón y el acero. Más allá de las mejoras que supone en estado fresco en términos de trabajabilidad del material, se han comprobado sus efectos positivos sobre la resistencia a compresión, dando lugar a resistencias más altas los hormigones en los que aparece el humo de sílice.

Si bien la química no ha hecho milagros en el campo del hormigón proyectado, no es menos cierto que el desarrollo de esta técnica en los últimos años, tanto en la calidad del hormigón como en la aceptación de esta técnica por parte de muchos profesionales de la construcción, se debe a la aparición de nuevos aditivos químicos que han proporcionado soluciones eficaces a muchos de los problemas que han surgido a medida que se ha ampliado el rango de utilización de esta técnica.

A continuación se presentan los diversos aditivos químicos que juegan un papel relevante dentro del hormigón proyectado, haciendo hincapié en los aditivos de curado interno y en los aditivos reductores de retracción, objeto del presente trabajo de investigación.

2.3.-ESTADO ACTUAL DE LOS ADITIVOS QUÍMICOS EN EL HORMIGÓN PROYECTADO POR VÍA HÚMEDA

2.3.1.-Superplastificantes

Como ya se ha comentado anteriormente, tanto los robots de proyección como los equipos manuales requieren unas características al hormigón fresco que se pueden resumir en que la mezcla debe ser cohesiva y muy tixotrópica. A medida que la presión hidráulica de bombeo se va elevando nos indica que la mezcla no reúne las características adecuadas. En estas condiciones la pasta formada por el agua y el cemento, se desliza entre el exterior del núcleo de hormigón y la superficie interior de la manguera, entonces el árido queda "seco" y se produce el atasco o disminuye el rendimiento de la proyección como mal menor, y aumenta el desgaste del equipo y el nivel de rechazo, ya que la lechada de cemento se pierde pulverizándose.

Fluidez y bombeabilidad son conceptos similares pero no iguales. Un hormigón puede presentar una consistencia muy fluida pero no ser bombeable por presentar un bajo porcentaje de fracción fina. Al aumentar el contenido de finos, se eleva la demanda de agua y por tanto la relación agua / cemento aumenta de forma considerable. Así,

surgieron los plastificantes en primera instancia, de habitual uso en aplicaciones con hormigón moldeado, donde la alta densidad de armaduras en determinados lugares obliga a que el hormigón sea fluido.

Los superplastificantes surgieron como la evolución lógica de estos, cuando los requisitos de fluidez y resistencia fueron siendo cada vez más exigentes, como es el caso de hormigones de alta resistencia o como en el caso que tratamos, el hormigón proyectado.

En hormigón proyectado el porcentaje de finos (árido fino + cemento) puede alcanzar el 70-75% en peso, con asentamientos de 15-17 cm a la media de su fabricación, y con resistencias especificadas en proyecto superiores a 30 N/mm². Así la única manera de mantener una relación agua / cemento baja, con asentamientos tan altos es la incorporación de aditivos que reduzcan la demanda de agua, como es el caso de estos aditivos.

Entre los superplastificantes se distinguen dos grupos, los basados en melamina o naftaleno, comunes al tradicional hormigón moldeado, y los basados en copolímeros vinílicos policarboxílicos ó más conocidos como del alto rango, aunque más bien se puede entender que el segundo grupo es una sucesión natural de los primeros, que producen un menor aumento de la trabajabilidad o bombeabilidad, que en este caso son términos sinónimos.

Con estos aditivos se puede llegar a reducir la demanda de agua del hormigón hasta en un 40%, además de mantener las propiedades del hormigón fresco más de 60 minutos sin necesidad de emplear estabilizadores o retardantes.

2.3.2.-Estabilizadores de fraguado

Los estabilizadores ó aditivos de control de hidratación actúan sobre la reacción de hidratación de la pasta de cemento, siendo esta reacción la que controla las características del fraguado, endurecimiento y resistencia del hormigón junto con la relación agua / cemento.

Estos aditivos surgieron ante la necesidad de mantener el hormigón durante un largo periodo de tiempo en unas condiciones de fluidez muy elevadas. En muchas ocasiones, sobre todo en el ámbito de las construcciones subterráneas y/o estabilización de taludes, los tajos suelen estar bastante alejados de los centros de fabricación de hormigón, bien por distancia o por la inexistencia de accesos adecuados, con lo que el periodo de transporte se puede alargar hasta dos ó tres horas después de su fabricación (incluso más).

El uso de superplastificantes no daba respuesta a este problema, ya que su rango de actividad está restringido en la mayoría de los casos a la primera media hora, cuando el hormigón empieza a ser más viscoso y hace imposible la proyección del material.

Los estabilizadores de fraguado ó retardadores, actúan de forma que neutraliza la reacción de hidratación del cemento, dejándola como en un estado de `` coma ´´, dando tiempo a que el hormigón llegue al tajo y se pueda proyectar.

Esta reacción provoca una rápida liberación de iones de calcio en solución, y forma una capa de gel de CSH alrededor de las partículas de cemento. A medida que la pasta fragua, se produce la floculación de los hidratos formados por la hidratación del cemento; mediante este proceso, la pasta plástica y trabajable se convierte en un material rígido.

Estos productos dispersados en el hormigón, controlan la rapidez de hidratación formando un complejo de iones calcicos en las superficies de las partículas de cemento.

Los estabilizadores pueden controlar la hidratación de las mezclas de la pasta por periodos de hasta 3 días.

La gran diferencia de los estabilizantes respecto de los retardantes es que controlan la hidratación del silicato tricalcico C_3S y del aluminato tricalcico C_3A sin perdida de trabajabilidad.

Estos actúan por partida doble: detiene la hidratación del cemento formando una barrera protectora alrededor de las partículas puzolánicas, y actúan como dispersante, previniendo así la floculación y endurecimiento de los hidratos.

La acción de esta barrera se puede eliminar de dos formas distintas, la primera dejando que discurra el tiempo suficiente hasta que se evapore y la segunda con la aplicación de un Activador un momento antes de verter la mezcla sobre la tolva de recepción del equipo de proyección. Una vez esta barrera es eliminada, la pasta reacciona de forma normal.

La calidad del producto final con la aplicación de un estabilizador no tiene porque ser inferior a la de otro sin este aditivo, pero en cualquier caso todos los fabricantes de estos productos aconsejan realizar diversas pruebas para obtener un hormigón con las características adecuadas.

2.3.3.-Acelerantes

Como el propio nombre indica estos aditivos activan o aceleran la velocidad de reacción de hidratación de la pasta de cemento. El acelerante se incorpora justo a la salida de la pistola (boquilla) de proyección, mezclándose entonces con el hormigón.(ver figura 2.1)

Tradicionalmente, los acelerantes que se ha venido utilizando estaban basados en aluminatos o silicatos, dependiendo de la legislación de cada país, pero debido a la exigencias cada vez mayores en cuanto Seguridad y Salud en el trabajo, se han desarrollado una nueva gama de aditivos acelerantes denominados Alkalí-Free ó libres de álcalis. Como se muestra en la figura 2.13, los acelerantes basados en aluminatos tienen un pH⁺ muy básico. El acelerante, como ya se ha explicado en apartados anteriores, se aplica en la boquilla junto con el aire a presión, produciendo la dispersión de numerosas partículas, entrando en contacto con los ojos, piel, vías respiratorias provocando serios problemas de salud a los trabajadores. Además, la manipulación de estos productos se debe realizar con sumo cuidado, ya que puede provocar numerosas afecciones. Los alkali-free reducen considerablemente el riesgo de afecciones, sobre todo de tipo cutáneo, mientras que los problemas respiratorios se deben solucionar con el uso de protecciones individuales diseñadas para ello.

Ambos tipos de acelerantes son sensibles al tipo de cemento, por lo que se recomienda realizar pruebas antes de la aplicación en obra.

El término alkali-free no es del todo cierto, sino que se denomina así a aquellos que tienen un contenido de cationes Na⁺, K⁺ o Li⁺ inferior al 1% expresado en equivalentes de Na₂O, con un rango de acidez de 2-7.

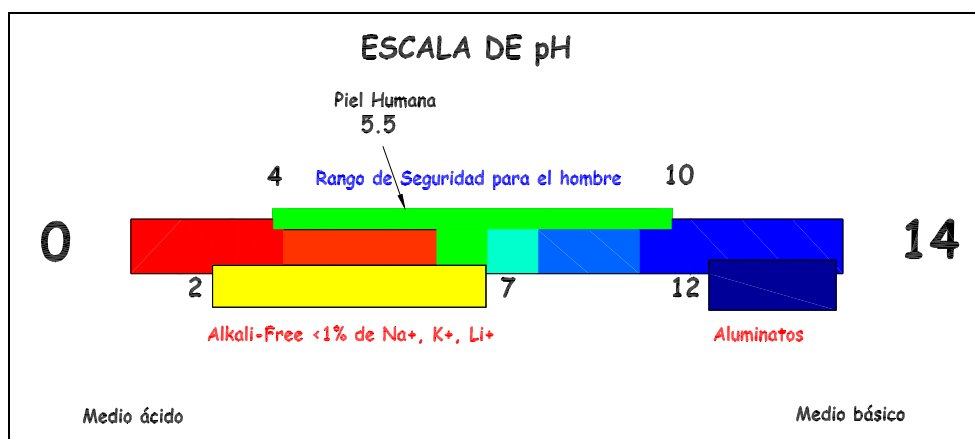


Figura 2.15. Escalas de pH y su relación con el hombre.

El efecto de los acelerantes tradicionales (aluminatos) sobre la resistencia a compresión a largo plazo es de sobras conocido, tanto en el hormigón proyectado como en el hormigón convencional, siendo habituales rebajas del entorno del 20-30%, mientras que con los Álcali-free esas pérdidas se reducen hasta un 5-10%. Esta reducción irá en función del aditivo en concreto y el porcentaje de dosificación.

Por el contrario, para obtener el mismo incremento de resistencia a edades tempranas, la dosificación de alquí-free debe aumentarse en un 3-4% respecto los acelerantes convencionales, como se muestra en la figura 2.16 en la que se muestra el tiempo de inicio y final de fraguado para tipos de acelerantes.

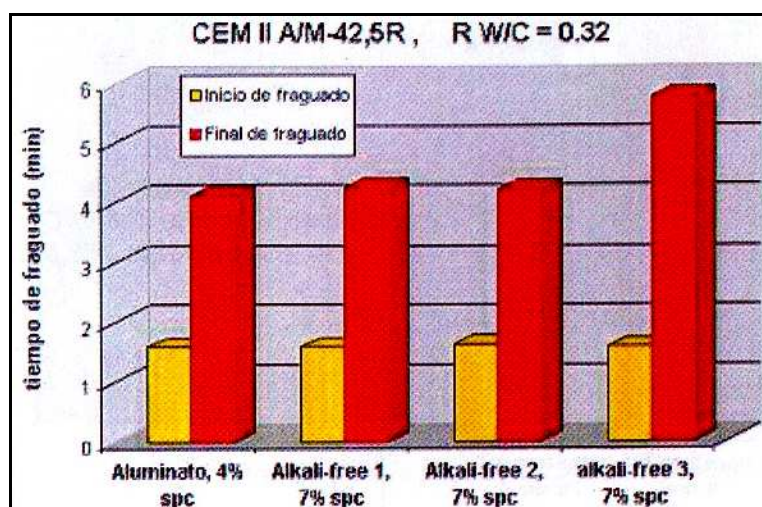


Figura 2.16. Inicio y final de fraguado con varios tipos de acelerantes.

Un problema asociado a la utilización de todo tipo de acelerantes es la dispersión en cuanto a los resultados de resistencia a lo largo del paramento proyectado. La dosificación del acelerante se produce de forma continua, mientras que el hormigón es transportado por flujo en pistón, este desequilibrio provoca que la concentración de acelerante sea muy irregular con la consecuente dispersión de los valores de resistencia. Con la utilización de robots automáticos y sistemas de dosificación de aditivos cada vez más perfeccionados están reduciendo este problema.

2.3.4.-Aireantes

La utilización de aditivos aireantes o más técnicamente, que incorporan aire ocluido en la mezcla es de sobras conocida en el hormigón convencional. La finalidad principal de la incorporación de estos aditivos es aumentar la resistencia frente a ciclos de hielo-deshielo del hormigón. El mecanismo de actuación se basa, en crear una red de

poros uniforme y con un tamaño determinado en la pasta de cemento, de forma que el volumen de poros accesibles sea lo suficientemente elevado para admitir el aumento de volumen que experimenta el agua al congelarse. El tamaño de los poros influye en la presión intersticial de los poros, presión que hace descender la temperatura de congelación del agua en unos grados.

En hormigón proyectado, además de este aspecto, hay que añadir que la incorporación de burbujas de aire en la mezcla mejora las condiciones a la hora de transportar el material a través de la manguera.

2.3.5.-Reductores de polvo

Estas adiciones, derivadas de la celulosa, han sido desarrolladas en laboratorios de investigación, en colaboración con agencias corredoras de seguros, en países como Alemania o Austria (1994), habiendo mostrado buena compatibilidad con todo tipo de acelerantes y sin experimentar disminuciones en las resistencias iniciales y finales del hormigón. La disminución del polvo alcanza valores del 50%, pero por el contrario su desventaja se encuentra en el elevado precio por m^3 , por lo que su implantación en España ha sido escasa.

2.3.6.-Aditivos de curado interno (Internal Curing)

El curado del hormigón proyectado, a pesar de estar recomendado su aplicación en las diferentes normas existentes, en el campo de la construcción subterránea no se aplica por diferentes razones, como son la escasa accesibilidad, por ritmos de producción, etc...

El curado en el hormigón proyectado debería ser una de los trabajos básicos debido a varias razones. El alto contenido de agua junto a las grandes cantidades de cemento hace que este material presente una alta contracción, y por tanto, un elevado potencial de fisuración. Actuando en la misma dirección, están la rápida hidratación de la pasta de cemento, debido al uso imprescindible de acelerantes, la aplicación de pequeños espesores y la más que frecuente ventilación del frente de trabajo.

Por todos estos motivos, el hormigón proyectado debería siempre curarse mediante un agente de curado eficiente. Sin embargo, en la construcción subterránea tales agentes tienen varias restricciones: deben estar libres de solventes, no deben afectar a la adherencia entre capas y deben aplicarse inmediatamente después de la proyección. Así no es de extrañar que la gran mayoría del hormigón proyectado en el campo de la construcción subterránea presente problemas de falta de adherencia y de fisuración excesiva.

Con el uso del hormigón proyectado como revestimiento permanente, han aumentado los requisitos tanto de resistencia, durabilidad, estéticos y por supuesto de producción. Así no es extraño que en el proyecto se exija una buena adherencia, alta densidad final, resistencia a compresión, resistencia frente a ciclos de hielo-deshielo, resistencia química y baja permeabilidad.

Ni que decir tiene que el curado no es la solución frente a todos estos condicionantes, pero sí juega un papel importante junto a otras medidas como la elección correcta de los materiales, ejecución de la proyección, introducción de aire oculto etc.

Para que el curado se realice de forma efectiva, el producto debe aplicarse en los 15-20 minutos siguientes a la proyección. Debido al uso de acelerantes de fraguado, la hidratación del hormigón comienza inmediatamente después de su colocación, con lo que se produce un aumento notable de la temperatura, y es muy importante proteger al hormigón en esta etapa crítica.

Por todos estos motivos, la aplicación de los agentes de curado convencionales en forma de película impermeable, presenta grandes inconvenientes tanto desde el punto de vista técnico como económico, puesto que ralentiza de forma evidente el ritmo de trabajo. Así el curado interno surgió como respuesta a estos problemas.

El curado interno, surgido en los últimos 5 años, es un sistema para lograr un curado más eficaz en el hormigón proyectado por vía húmeda. El aditivo, basado en compuestos poliméricos, se añade a la mezcla junto con el resto de aditivos superplastificantes, aireantes, etc.. durante el proceso de fabricación del hormigón. Este aditivo genera una barrera interna en el hormigón, la cual facilita una mejor hidratación y por tanto una mejor resistencia que la que ofrecen los agentes de curado convencionales, en forma de películas impermeables.

Este sistema, como ventajas de tipo operativo tiene que elimina por completo la aplicación posterior a la proyección de una película / membrana de curado y su consecuente limpieza, y no afecta a la adherencia entre capas. Como ventaja en cuanto a la calidad del material es que se consiguen mayores resistencias.

Este sistema aún se encuentra en etapa de experimentación, por lo que no se conoce ninguna realización de hormigón proyectado con aditivos de curado interno en España, pero los resultados de diversos trabajos de investigación apuntan una notable mejora de las propiedades en hormigones curados con este sistema.

En esta dirección va la investigación realizada en la Universidad de Nueva Gales del Sur, por los profesores N.Gowripalan, R.Marks y H.Morris, en la que se realiza una comparativa de la eficacia de diversos métodos de curado (en hormigón convencional), entre los que se encuentran el curado mediante membrana externa y la adición de

aditivos de curado interno de diversa naturaleza en la que se pone de manifiesto que se alcanzan valores de resistencia a compresión tanto a 7 como a 28 días (figura 16), similares entre las muestras en las que se ha aplicado la membrana impermeable y las muestras con aditivo de curado interno con dosificaciones del entorno de 2-5 litros / m³, lo cual refuerza la idoneidad de este último.

También deja indicado que aumentando la dosificación de estos, no se producen mejoras de resistencia, sino todo lo contrario llegando a rebajas del 25 % en la resistencia a 28 días. En relación a una posible disminución de la porosidad, los resultados de este estudio no muestran indicios de esta tendencia.

En cuanto a relación de evaporación y la absorción de agua en probeta, se obtienen valores prácticamente idénticos entre el hormigón curado con agentes externos de curado y los hormigones con dosificaciones de 5 litros / m³ de agentes de curado interno.

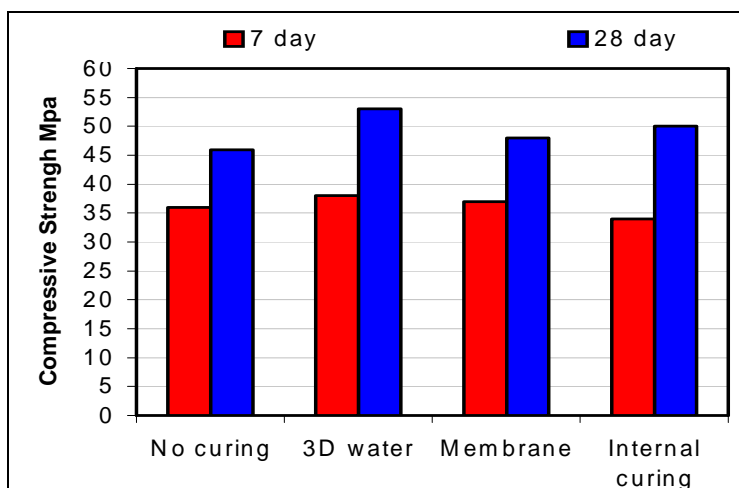


Figura 2.17. Resistencia a compresión con varios métodos de curado con hormigón convencional.

De estos resultados se extrae que ambos métodos de curado son equivalentes, en cuanto a las propiedades físicas y mecánicas del material, y por tanto, la evaluación del coste económico se realiza de forma homogénea, poniendo de manifiesto el importante ahorro que se puede obtener aplicando este nuevo sistema.

Los estudios realizados por T.Melbye, de la división de trabajos subterráneos de la compañía MBT- International (MBT-UGD), en aplicaciones de hormigón proyectado por vía húmeda con aditivos de curado interno cuya base química son las ceras, muestran la eficacia de este sistema en cuanto a valores de resistencia a compresión a 28 días, el módulo de elasticidad estático incrementa en un 5%, no afectando para nada a la adherencia entre capas, como se aprecia en la figura 2.18.

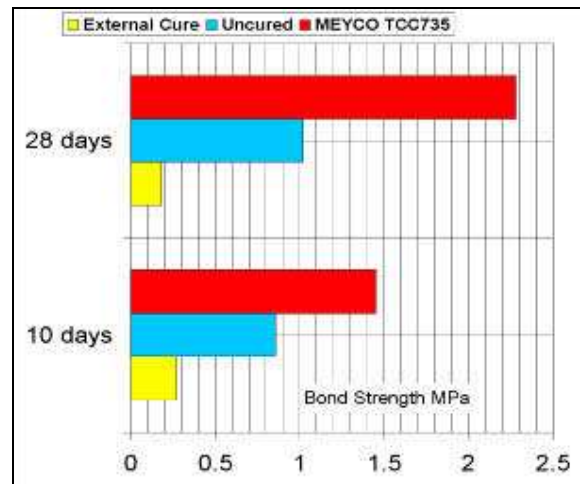


Figura 2.18. Adherencia en hormigón proyectado con curado convencional, sin curar y con el curador interno (Meyco TCC 735).

Estudios realizados en el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Catalunya, Lascorz (2002), en mezclas de hormigón proyectado por vía húmeda mostraron que la inclusión de un aditivo de curado interno en la mezcla permite alcanzar las mismas prestaciones, en cuanto a resistencia se refiere, que las alcanzadas en el hormigón proyectado curado de forma convencional durante 28 días, bajo unas condiciones de humedad y temperatura muy desfavorables. Por contra, se destaca que la influencia de las condiciones ambientales o de curado sobre las distintas propiedades en el hormigón proyectado, queda relegada a un segundo término por la elevada porosidad que presenta este material, resultado del propio proceso de transporte y puesta en obra, convirtiéndose en el verdadero factor limitante del hormigón proyectado. En la figura 2.19 se muestra la evolución de la resistencia y módulo de elasticidad en compresión de probetas de hormigón proyectado por vía húmeda con y sin aditivo de curado interno en idénticas condiciones de curado (20°C y 50% H.R.)

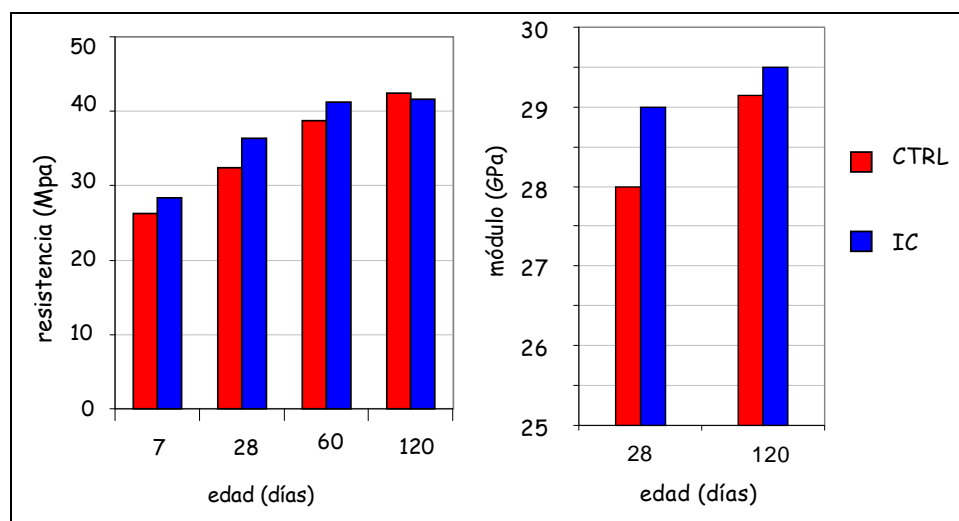


Figura 2.19. Evolución de la resistencia y módulo de elasticidad de hormigón proyectado por vía húmeda con y sin aditivo de curado interno (IC).

Asimismo, en términos de retracción, el aditivo de curado interno no se mostró eficaz, con valores de retracción a 180 días en paneles de hormigón proyectado por vía húmeda con y sin aditivo similares entorno a los 0,6-0,7 mm/m.

2.3.7.- Aditivos reductores de retracción

Por las características que presenta el hormigón proyectado, es un material con especial disposición a tener problemas de retracción, elevados contenidos de cemento, altas relaciones agua-cemento, grandes superficies de exposición con pequeños espesores etc...

La retracción es una propiedad inevitable del hormigón como tal, que se introduce en el cálculo estructural como una acción impuesta por la composición del material, especialmente del contenido de cemento y la relación agua / cemento, y por supuesto, de las condiciones ambientales.

Los diferentes mecanismos que producen la retracción se definen a continuación, siendo su significación muy distinta en función de las variables anteriormente mencionadas.

Retracción plástica: Se debe a deformaciones producidas en el hormigón fresco, por la pérdida de agua con el medio ambiente. En hormigones convencionales, la exudación del exceso de agua en la mezcla, compensa la pérdida de humedad, y consecuentemente no provoca deformaciones o fisuración relevantes, excepto en ambientes de exposición extremos. Por otro lado, en hormigones de altas resistencias y relaciones agua / cemento bajas, no hay exceso de agua, y en condiciones adversas se pueden llegar a producir fisuras de varios centímetros de profundidad.

Retracción térmica: Las reacciones exotérmicas de la hidratación del cemento representan un aumento de temperatura en el hormigón durante la primera etapa, lo cual significa una dilatación del elemento. Una vez alcanzada la temperatura máxima, el elemento se enfría de manera progresiva hasta alcanzar la temperatura ambiental; en consecuencia, el hormigón ya endurecido se contrae, provocando deformaciones del tipo de la retracción. Estas deformaciones son especialmente significativas en hormigones con altos contenidos de cemento y elementos de grandes dimensiones donde la calor de disipación es lenta.

Retracción química: Las reacciones químicas entre el cemento y agua conduce a productos con un volumen menor que los reactivos, provocando la deformación de la pasta hidratada del cemento, y consecuentemente, del hormigón.

Retracción por autodesecación: En hormigones con bajos contenidos de agua y con micro estructuras densas e impermeables, el agotamiento del agua libre debido a la

hidratación del cemento produce humedades internas bajas, hasta un 70% durante las primeras edades. Esta autodesecación puede provocar retracciones significativas, especialmente en hormigones de alta resistencia.

Retracción por secado: La pérdida del agua libre en el interior del elemento buscando un equilibrio con la humedad del ambiente produce unas deformaciones de contracción del hormigón. En hormigones convencionales, es el mecanismo más relevante y usualmente es el único que se tiene en cuenta en el cálculo estructural.

Retracción por carbonatación: La carbonatación del cemento hidratado en contacto con el CO_2 del ambiente, durante la vida de la estructura, provoca una retracción del hormigón; si bien es un efecto limitado a una capa superficial en hormigones de buena calidad, no resultando significativa en hormigones con permeabilidad baja.

Han sido numerosos los intentos por reducir la retracción en hormigón convencional a base de modificar la composición del material; reducción del contenido de agua, reducción del contenido de cemento y / o la utilización de cementos y adiciones especiales; hasta que aparecieron los aditivos químicos reductores de retracción.

Aparecen las primeras referencias técnicas de estos compuestos en Japón a finales de los 80's. Estos productos se basaban en agentes orgánicos que modifican la tensión superficial del agua en los poros; incorporándose al hormigón junto con el agua de amasado. La composición química de estos primeros respondía a la oxidación de hidroxialquenos, derivados de glicol éter o polipropilén glicol, siendo este último tipo de ARR, el que más interés ha despertado.

Otros sistemas de ARR diferentes a este son basados en ceras, que trabajan de forma diferente, dificultando simplemente la pérdida de agua, pero los resultados obtenidos en diferentes estudios no han convencido a la comunidad investigadora.

Hasta el momento no se conoce ninguna realización con hormigón proyectado en la que se hayan utilizado este tipo de aditivos, pero a priori se pueden extrapolar resultados y conclusiones de experiencias en otros tipos de hormigón, como por ejemplo, un estudio realizado por Folliard y Berke (1997) con productos derivados del polipropilén glicol, se observó una reducción del 35% de la retracción por secado a 28 días, mientras que en hormigones con adiciones de microsílice esta cifra se elevaba hasta un 52%.

Este último dato es especialmente interesante en las aplicaciones en el entorno del hormigón proyectado puesto que cada vez es más habitual sustituir parte de cemento por humo de sílice para dotar de una mayor cohesión a la mezcla y evitar así problemas de segregación en casos en que se demanda una fluidez elevada.

En dicho estudio también se remarca un ligero efecto plastificante, lo que posibilita la disminución de la relación a/c o la dosificación de superplastificante. Trabajos posteriores de los mismos investigadores con productos basados en Glicol éter obtuvieron resultados similares.

En cuanto a las características mecánicas tanto instantáneas como diferidas, Brooks y Jiang (1997) con aditivos basados en polipropilénglicol, observaron unas reducciones de resistencias y en el módulo de deformación a 28 días, con dosificaciones del entorno de 1.5% en peso de cemento.

En un estudio realizado en el entorno del Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC, J. Roncero (2001), basado en el mismo tipo de aditivos se han obtenido resultados totalmente en sintonía a los anteriores, poniendo de manifiesto esa reducción en la resistencia, siendo esta más acusada cuanto mayor es la dosificación. La figura 19 muestra la evolución de la retracción por secado para hormigón moldeado con y sin aditivo reductor de retracción (ARR-1 y ARR-2).

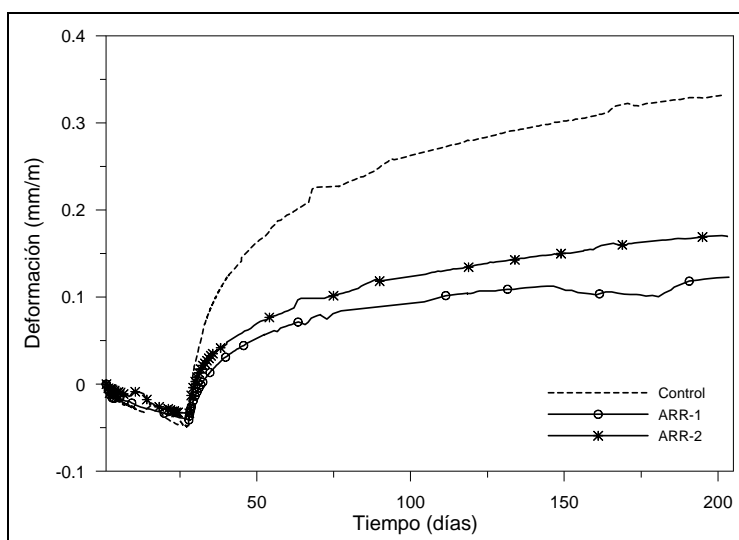


Figura 2.20. Retracción por secado en hormigón moldeado.

Por todos estos motivos, es hora de estudiar su comportamiento en el campo del hormigón proyectado, debido a las particularidades que presenta este material. En el estudio realizado por R. Morgan (1993) se caracteriza la retracción por secado de un hormigón proyectado por vía húmeda, con la incorporación de humo de sílice en la mezcla.

Después de 100 días desde el comienzo del secado, se alcanzaron deformaciones de 0.9 a 1.1mm/m, como se ve muy superior a lo obtenido en hormigones convencionales.

Los estudios de Lascorz (2002) sobre la utilización de aditivos reductores de retracción en mezclas de hormigón proyectado por vía húmeda han mostrado la misma

eficacia, en términos de retracción (figura 2.21), de estos aditivos, si bien por contra a los hormigones convencionales, no se registraron diferencias en cuanto a la resistencia a compresión del material (figura 2.22). En este sentido se apunta a la mayor porosidad del hormigón proyectado, con respecto a un hormigón convencional, como el principal agente gobernante de la resistencia del material, dejado a otras variables, como son entre otras la incorporación de un determinado tipo de aditivo, en un segundo plano o incluso enmascarando totalmente su influencia.

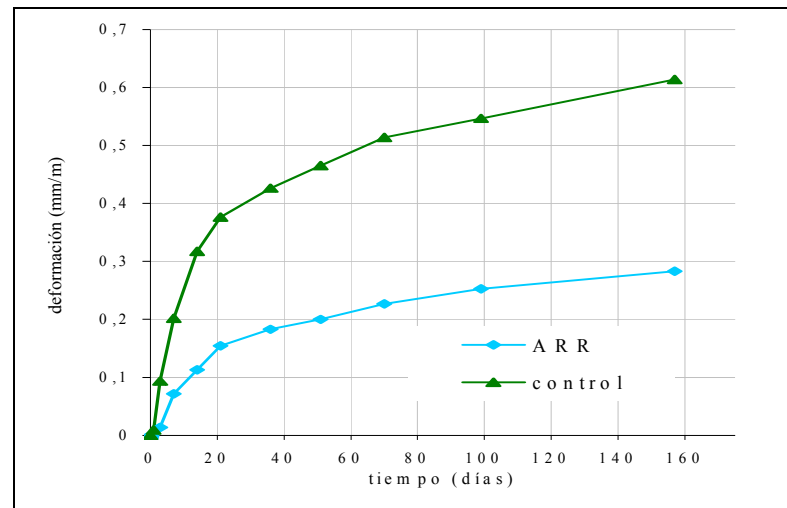


Figura 2.21. Retracción por secado en paneles de hormigón proyectado por vía húmeda con y sin aditivo reductor de retracción (ARR).

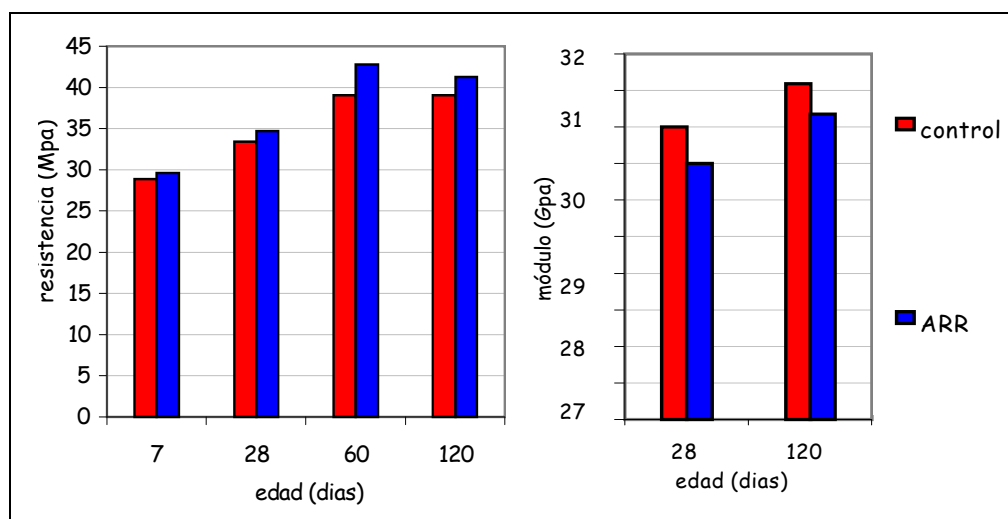


Figura 2.22. Evolución de la resistencia y módulo de elasticidad de hormigón proyectado por vía húmeda con y sin aditivo reductor de retracción (ARR).